

⑬ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑪ **DE 3026652 A1**

⑤ Int. Cl. 3:
B61 L 27/04

⑳ Aktenzeichen: P 30 26 652.5
㉑ Anmeldetag: 14. 7. 80
㉒ Offenlegungstag: 11. 2. 82

㉓ Anmelder:
Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München, DE

㉔ Erfinder:
Tchinda, Albert, Dipl.-Ing., 3300 Braunschweig, DE

DE 3026652 A1

⑤④ Einrichtung zum energieoptimalen Fahren von Schienenfahrzeugen in Nahverkehrssystemen

*allgemeines Verfahren zum Reduzieren von
Fahrerlogie. 19.07.01 FN*

DE 3026652 A1

ORIGINAL INSPECTED

Patentansprüche

3026652

1. Einrichtung zum energieoptimalen Fahren von Schienen-
fahrzeugen in Nahverkehrssystemen, bei denen die Fahr-
zeuge unter Einhaltung des Fahrplanes jede folgende Halte-
stelle möglichst pünktlich erreichen sollen, diese zu
5 unterschiedlichen Zeitpunkten wieder verlassen, wobei
jedes Fahrzeug mit Fahrzeuggerät, Sende- und Empfangs-
einrichtungen, Meßeinrichtungen zur Orts- und Geschwin-
digkeitsbestimmung ausgerüstet ist und mit einer ortsfesten
Operationszentrale und einem ortsfesten Stationsrechner
10 Datentelegramme austauschen kann, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t , daß das Fahrzeuggerät (FT)
einerseits kontinuierlich den Ort (s_H) von festen bzw.
beweglichen Gefahrenpunkten von der Operationszentrale (OZ)
und andererseits punktförmig an jeder Haltestelle das
15 Geschwindigkeitsprofil (v-Profil) und einen Zustandsqua-
der (ZQ) mit energieoptimalen Steuergrößen für den
Streckenabschnitt bis zur nächsten Haltestelle vom Sta-
tionsrechner (STR) empfängt, daß das Fahrzeuggerät (FT)
unter besonderer Berücksichtigung der Einhaltung des Ge-
20 schwindigkeitsprofils, der sicheren Abstandshaltung zu
den Gefahrenpunkten, der wechselnden Streckenwiderstände
und Fahrwiderstände die Regelungsaufgaben zum energie-
optimalen Fahren löst und zusätzlich sicherheitstechni-
sche Aufgaben erfüllt.

25

2. Einrichtung nach Anspruch 1, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t , daß ein zentraler Rechner (ZR)
in der ortsfesten Operationszentrale vorhanden ist, der
für jeden Fahrzeugtyp und jeden Streckenabschnitt zwischen
30 zwei Haltestellen einen Zustandsquader (ZQ) erstellt,
dessen Kanten der längsten Fahrzeit (t_f), dem Haltestellen-
abstand und der Streckenhöchstgeschwindigkeit entsprechen,
daß an jedem Punkt im Zustandsquader (ZQ) eine energie-
optimale Steuergröße vorgemerkt ist, die nach dem
35 Optimierungsverfahren von Bellman unter Berücksichti-

130066/0148

ORIGINAL INSPECTED

3026652

-18-2-

VPA 80 P 8030 DE

gung von wegabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen (Geschwindigkeitsprofil), Streckenneigungen (Gefälle, Steigungen) und Fahrzeugdaten ermittelt wird.

- 5 3. Einrichtung nach Anspruch 2, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t , daß die energieoptimalen Steuer-
größen $u(v, s, t)$ in Abhängigkeit von der Geschwindig-
keit, dem Weg und der Fahrzeit ermittelt werden.
- 10 4. Einrichtung nach Anspruch 1, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t , daß die Aufgaben des Fahrzeug-
gerätes (FT) in Fahrzeugsicherung (FG2) und Fahrzeug-
steuerung (FG1) aufgetrennt sind.
- 15 5. Einrichtung nach den Ansprüchen 1 bis 4, d a d u r c h
g e k e n n z e i c h n e t , daß nach der Ankunft des
Fahrzeugs an der Haltestelle der Zustandsquader (ZQ) mit
den energieoptimalen Steuergrößen auf das Fahrzeuggerät
übertragen wird, womit das Fahrzeug energieoptimal bis
20 zur nächsten Haltestelle geführt wird, wenn das Signal
Fahrt (FS1) von der Operationszentrale oder an Bord des
Fahrzeugs ausgelöst wird und falls die Fahrzeit nicht
mehr ausreicht, um energieoptimal zu fahren, ein anderes
Signal (FS2) an die Fahrzeugsicherung gesendet wird, die
25 das Fahrzeug bis zur nächsten Haltestelle führt.
6. Einrichtung nach den Ansprüchen 4 und 5, d a d u r c h
g e k e n n z e i c h n e t , daß die Fahrzeugsteuerung
einen energieoptimalen Regler (EOR) beinhaltet, nach je-
30 dem Abtastzeitintervall (T) die Meßwerte (Geschwindigkeit,
Weg) von den Meßeinrichtungen erhält und damit die ent-
sprechende energieoptimale Steuergröße aus dem Zustands-
quader (ZQ) entnimmt, die als Fahrbefehl an die Antriebs-
organe gegeben wird, wenn die Meßwerte mit den Koordi-
35 naten eines Gitterpunktes im Zustandsquader (ZQ) zusammen-
fallen.

130066/0148

7. Einrichtung nach Anspruch 6, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t , daß der energieoptimale Regler
(EOR) einen Modul enthält, der mit Hilfe des mathemati-
schen Fahrzeugmodells (MFM) die energieoptimale Steuer-
5 gröÙe näherungsweise bestimmt, wenn die Meßwerte nicht
mit den Koordinaten eines Gitterpunktes im Zustands-
quader (ZQ) zusammenfallen.
8. Einrichtung nach Anspruch 4, d a d u r c h g e -
10 k e n n z e i c h n e t , daß die Fahrzeugsteuerung ein
mathematisches Fahrzeugmodell (MFM) enthält, das immer
parallel zum realen Fahrzeug mitfährt und zur Korrektur
der energieoptimalen Steuergrößen dient, wenn das Fahrzeug
durch Einflüsse von Störungen (z.B. Gegenwind) die ener-
15 gieoptimale Trajektorie verlassen hat.
9. Einrichtung nach den Ansprüchen 2 und 3, d a d u r c h
g e k e n n z e i c h n e t , daß die energieoptimale
SteuergröÙe nach jeder Abtastzeit in Abhängigkeit von
20 Meßwerten (Geschwindigkeit, Ort) aus dem Zustandsquader
(ZQ) entnommen oder durch Interpolation ermittelt wird.
10. Einrichtung nach den Ansprüchen 2, 3 und 9 d a -
d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß die Kante
25 des Zustandsquaders (ZQ), die mit der Zeitachse überein-
stimmt, die Menge aller Abfahrzeitpunkte aus dem Quellen-
bahnhof darstellt, daß zur Erstellung des Zustandsquaders
(ZQ) die längste Fahrzeit gewählt wird und bei der Ab-
fahrt vom Quellenbahnhof der energieoptimale Regler (EOR)
30 gemäß dem Abfahrzeitpunkt auf der Zeitachse die zugehö-
rige energieoptimale SteuergröÙe aus dem Zustandsquader
(ZQ) entnimmt.
11. Einrichtung nach den Ansprüchen 2, 3 und 9 d a -
35 d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß die Kanten
des Zustandsquaders (ZQ), die mit der Zeit- und Ortsachse
Übereinstimmen, die Menge aller Punkte des Zustandsqua-

130066/0148

ORIGINAL INSPECTED

ders (ZQ) mit der Geschwindigkeit Null darstellt.

12. Einrichtung nach Anspruch 4, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t , daß die Umschaltstrategie (UE)
5 nach jeder Abtastzeit die Grenzgeschwindigkeit, die aus
den wegabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen ermittelt
wird (VGR), mit der Augenblicksgeschwindigkeit, die aus
der Meßwerterfassung gewonnen wird, vergleicht, daß bei
Gleichheit der Augenblicks- und Grenzgeschwindigkeit der
10 Einfluß der Fahrzeugsteuerung (FG1) auf das Fahrzeug un-
wirksam gemacht wird (Schalter S1) und der Geschwin-
digkeitsregler (VR) die weitere Führung des Fahrzeuges
übernimmt.
- 15 13. Einrichtung nach Anspruch 4, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t , daß die Umschaltstrategie (UE)
nach jeder Abtastzeit die Differenz aus dem Meßwert (Ort)
und dem Hindernisort, der kontinuierlich auf das Fahrzeug-
gerät (FT) übertragen wird, mit dem Bremsweg vergleicht
20 und daß bei Gleichheit der beiden Größen der Einfluß der
Fahrzeugsteuerung (FG1) auf das Fahrzeug unwirksam
gemacht wird (Schalter S1) und der Abstandsregler (AG)
die weitere Führung des Fahrzeuges übernimmt.
- 25 14. Einrichtung nach den Ansprüchen 12 und 13, d a -
d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß der Abstands-
regler (AG) und der Geschwindigkeitsregler (VR) sich ge-
genseitig überwachen, so daß, wenn der Abstandsregler (AG)
das Fahrzeug führt und die Grenzgeschwindigkeit überschrit-
30 ten wird, die Umschaltstrategie (UE) den Abstandsregler
(AG) ausschaltet und der Geschwindigkeitsregler (VR) die
weitere Führung des Fahrzeuges (Schalter S2) übernimmt
und umgekehrt, wenn der Geschwindigkeitsregler (VR) das
Fahrzeug führt und der Bremsweg unterschritten wird, die
35 Umschaltstrategie (UE) den Geschwindigkeitsregler (VR)
ausschaltet und der Abstandsregler (AG) die weitere Füh-
rung des Fahrzeuges übernimmt.

SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT
Berlin und München

Unser Zeichen
VPA 80 P 8 0 3 0 DE

5 Einrichtung zum energieoptimalen Fahren von Schienen-
fahrzeugen in Nahverkehrssystemen

- Die Erfindung bezieht sich auf eine Einrichtung zum energieoptimalen Fahren von Schienenfahrzeugen in Nahverkehrssystemen, bei denen die Fahrzeuge unter Einhaltung des Fahrplanes jede folgende Haltestelle möglichst pünktlich erreichen sollen, diese zu unterschiedlichen Zeitpunkten wieder verlassen, wobei jedes Fahrzeug mit Fahrzeuggerät, Sende- und Empfangseinrichtungen, Meßeinrichtungen zur Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung ausgerüstet ist und mit einer ortsfesten Operationszentrale und einem ortsfesten Stationsrechner Datentelegramme austauschen kann.
- 20 Derartige Einrichtungen sind beispielsweise aus der DE-PS 15 30 456 bekannt. Stadtbahnen sollen dadurch wirtschaftlich fahren, daß diese beim Verlassen einer Haltestelle zunächst so lange mit höchster Beschleunigung fahren, bis sie einen vorausberechneten Wert einer
- 25 nicht zu überschreitenden Spitzengeschwindigkeit (Abschaltgeschwindigkeit) erreicht haben. Danach fährt die Bahn ohne weitere Beschleunigung in einem Auslauf weiter, der kurz vor dem Erreichen der nächsten Haltestelle durch einen Bremsvorgang abgebrochen wird. Bei der
- 30 Ermittlung der zulässigen Spitzengeschwindigkeit wird jeweils die kürzeste Fahrzeit zwischen zwei Haltepunkten berücksichtigt. Als Reserve kann wegen der Unsicherheit bei der Erstellung des Fahrplans bzw. zur Berücksichtigung unterschiedlicher Anhängelasten ein Fahrzeitzuschlag gerechnet werden. Diese Fahrzeitreserve, die
- 35 bei automatischem Zugbetrieb klein ist, wird bei nor-HSH-6-Jd / 10.7.80

- 6 -
- 2 -

3026652
VPA 80 P 8030 DE

malem Betrieb, also ohne Verspätung für einen möglichst langen Auslauf benutzt. Dadurch wird die Spitzengeschwindigkeit nicht so hoch, und viel Energie kann gespart werden, da der Energieverbrauch annähernd mit dem
5 Quadrat der Spitzengeschwindigkeit zunimmt.

Bei den bekannten Einrichtungen wird ferner in Abhängigkeit vom Zeitraum zwischen dem fahrplanmäßigen Ankunftszeitpunkt eines Zuges an der betroffenen Haltestelle und
10 dem Abfahrzeitpunkt der Wert der Spitzengeschwindigkeit (Abschaltgeschwindigkeit) ermittelt. Wenn die Augenblicksgeschwindigkeit die Abschaltgeschwindigkeit erreicht hat, wird der Strom abgeschaltet, und das Fahrzeug rollt ungeregelt aus, bis die Bremsphase erreicht
15 ist. Es handelt sich hierbei um eine Steuerung. Der Einsatz einer derartigen Steuerung setzt voraus, daß der Triebfahrzeugführer bei ungünstigen Verhältnissen (z.B. Gegenwind) eingreifen muß, damit das Fahrzeug nicht vor dem Zielbahnhof zum Stehen kommt. Für einen vollautomatischen, fahrerlosen Zugbetrieb ist diese Möglichkeit
20 zur Realisierung des energieoptimalen Fahrens wenig geeignet, weil folgende Nebenbedingungen, die zum Verstoß gegen die Sicherheitsanforderungen führen können, nicht berücksichtigt werden können.

25 Es sind:

a) die konstanten Nebenbedingungen

- 1- Die wegabhängigen Streckenneigungen (Gefälle, Steigung)
- 2- Die wegabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen (Langsamfahrstellen)

30

b) die veränderlichen Nebenbedingungen

- 1- Der geschwindigkeitsabhängige Bewegungswiderstand (z.B. Gegenwind)
- 2- Die festen oder beweglichen Gefahrenpunkte.

130066/0148

Für ein automatisches Nahverkehrssystem ist es daher notwendig, die Realisierung des bekannten Prinzips des energieoptimalen Fahrens noch zu steigern.

- 5 Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Einrichtung der eingangs genannten Art so zu verbessern, daß die Fahrzeuge in Nahverkehrssystemen energieoptimal fahren unter Berücksichtigung der erwähnten Nebenbedingungen.
- 10 Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß das Fahrzeuggerät einerseits kontinuierlich den Ort von festen bzw. beweglichen Gefahrenpunkten von der Operationszentrale und andererseits punktförmig an jeder Haltestelle das Geschwindigkeitsprofil (v-Profil) und einen
- 15 Zustandquader mit energieoptimalen Steuergrößen für den Streckenabschnitt bis zur nächsten Haltestelle vom Stationsrechner empfängt, daß das Fahrzeuggerät unter besonderer Berücksichtigung der Einhaltung des Geschwindigkeitsprofils, der sicheren Abstandshaltung zu den Gefahrenpunkten, der wechselnden Streckenwiderstände und Fahrwiderstände die Regelungsaufgaben zum energieoptimalen Fahren löst und zusätzlich sicherheitstechnische Aufgaben erfüllt.
- 20
- 25 Mit Hilfe dieser Einrichtung ist es erstmals in vorteilhafter Weise möglich Nahverkehrsbahnen fahrplangerecht, energieoptimal, sicher vollautomatisch fahren zu lassen.
- 30 Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

Es zeigen:

- Figur 1 eine Übersichtsdarstellung in Blockform für Einrichtungen an der Strecke und auf einem Fahrzeug,
- 5 Figur 2 eine Gliederungsübersicht eines dezentralisierten Nahverkehrsautomatisierungssystems,
- Figur 3 einen Zustandsquader für ein Optimierungsverfahren nach Bellman,
- Figur 4 eine Beispielsrechnung nach dem Optimierungsprinzip in Anlehnung an den Zustandsquader nach Figur 3,
- 10 Figur 5 das Blockschaltbild eines zentralen Rechners zur Ermittlung energieoptimaler Steuergrößen,
- Figur 6 Einzelheiten einer Fahrzeugsteuerung und
- 15 Figur 7 das Blockschaltbild einer Einrichtung zur Fahrzeugsicherung.

Das Blockschaltbild nach Figur 1 veranschaulicht eine grobe Struktur des Fahrzeuggerätes FT in Verbindung mit streckenseitigen Einrichtungen. Diese übertragen an den Haltestellen punktförmige Informationen \underline{u} (v, s, t) sowie das v -Profil und kontinuierlich den Ort s_H von beliebigen Gefahrenpunkten. Die Aufgaben werden in Fahrzeugsteuerung FG1 und Fahrzeugsicherung FG2 aufgetrennt.

20 Auf diese Art wird auch eine klare Unterteilung jeweils bezüglich der Software und der Hardware möglich. Der Vorteil ist, daß der besondere Aufwand zum Erkennen von Fehlern, die zu Gefährdungen im Bahnbetrieb führen können, nur für die Sicherungsaufgaben eingesetzt zu werden braucht.

25 30

Die Fahrzeugsicherung FG2 überwacht die Fahrzeugsteuerung FG1 und veranlaßt über einen sicheren Schalter S1 entweder die Durchschaltung der Sicherungsbefehle USI oder der Steuerbefehle UST über einen D/A-Wandler WR1

35

- 9 -

VPA 80 P 8030 DE

an den Eingang der Stellglieder SMR. Die Sicherungsbe-
fehle USI gelangen dann zu den Stellgliedern SMR, wenn
die Sicherheitsanforderungen nicht mehr erfüllt sind
oder aufgrund einer Störung im Nahverkehrssystem sowie
5 einer langen Verspätung kein energieoptimales Fahren
möglich ist. Die sicherheitsrelevanten Einrichtungen
sind als doppelt gerahmte Blöcke dargestellt.

Bei den geringen Haltestellenabständen im Stadtbereich
10 werden die energieoptimalen Steuergrößen $u(v,s,t)$ zwi-
schen zwei Haltestellen bei Ankunft des Fahrzeugs an
jeder Haltestelle auf das Fahrzeuggerät übertragen. Hier-
zu sind sichere Empfangs- und Meßeinrichtungen vorgese-
hen. Vor der Abfahrt liegen also die Steuergrößen als
15 Funktion von der Geschwindigkeit, dem Ort und der Fahr-
zeit im Fahrzeuggerät vor. Die Steuergrößen haben keine
Sicherheitsverantwortung. Sobald das Signal Fahrt FS1
entweder von der Zentrale oder einer Einrichtung an Bord
des Fahrzeugs ausgelöst wird, wird mit Hilfe der ener-
20 gieoptimalen Steuergrößen und der gespeicherten energie-
optimalen Regelalgorithmen das Fahrzeug energieoptimal
bis zur nächsten Haltestelle vom Mikrorechner MR gere-
gelt. Die energieoptimale Fahrzeugregelung berücksich-
tigt die wegabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen
25 (Langsamfahrstellen), die Streckenneigungen (Gefälle,
Steigung) und kompensiert die Einflüsse der geschwindig-
keitsabhängigen Bewegungswiderstände (z.B. Gegenwind)
und die Meßfehler (Geschwindigkeit, Ort). Hierbei han-
delt es sich also um eine energieoptimale Regelung.
30 Später wird eine Einrichtung beschrieben, mit deren Hil-
fe die energieoptimalen Steuergrößen in der Zentrale ge-
wonnen werden. Falls eine eingetretene Verspätung so
groß ist, daß das Fahrzeug nicht mehr energieoptimal
fahren kann, wird ein Kommando FS2 an die Fahrzeug-
35 sicherung FG2 gesendet, damit das Fahrzeug nach dem Ge-

- 10 -

6-

VPA 80 P 8 0 3 0 DE

schwindigkeitsprofil (wegabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen) geführt wird.

- Die Fahrzeugsicherung FG2 überwacht, daß jedes Fahrzeug
5 einen ausreichend großen Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug oder zu einem festen Gefahrenpunkt einhält und außerdem die Augenblicksgeschwindigkeit v_{ist} nicht die Streckenhöchstgeschwindigkeit überschreitet. Die Umschaltstrategie UE überwacht kontinuierlich diese beiden
10 Sicherheitsanforderungen und sobald irgendeine davon nicht mehr erfüllt ist, schaltet sie den Einfluß der Fahrzeugsteuerung FG1 auf das Fahrzeug mit Hilfe des Schalters S1 aus, und eine der Sicherheitsfunktionen, Abstandshaltung AG oder Fahren nach dem Geschwindigkeits-
15 profil GL, übernimmt die weitere Regelung des Fahrzeuges. Die beiden Sicherheitsfunktionen der Abstandshaltung AG und des Fahrens nach dem Geschwindigkeitsprofil GL überwachen sich gegenseitig.
- 20 Angenommen das Fahrzeug fährt nach dem Geschwindigkeitsprofil GL und plötzlich taucht ein unvorhergesehenes Hindernis auf, z.B. ein vorausfahrendes Fahrzeug bleibt infolge Entgleisens schlagartig stehen. In diesem Augenblick muß die Umschaltstrategie UE das Fahren nach dem
25 Geschwindigkeitsprofil GL ausschalten und die Abstandshaltung AG einschalten. Diese beeinflußt das Fahrzeug in der Art, daß genau an dem Ort, an dem das Hindernis steht, das Fahrzeug seine Geschwindigkeit auf Null reduziert hat.
- 30 Bevor der Aufbau des Fahrzeuggerätes FT nach Figur 1 weiter erläutert wird, wird das Modell des dezentralisierten Nahverkehrsautomatisierungssystems nach Figur 2, in welchem das Fahrzeuggerät FT (Figur 1) betrieben wird,
35 näher beschrieben. Das Modell ist modular aufgebaut und in Dispositionszentrale DZ, Operationszentrale OZ, Stationsrechner STR1 bis STR3 und Fahrzeuggerät FT geglie-

130066/0148

- 11 -
~~7~~

VPA 80 P 8 0 3 0 DE

5 dert. Der Station werden die energieoptimalen Steuer-
größen \underline{u} (v, s, t) und die wegabhängigen Geschwindigkeits-
beschränkungen (v -Profil) zum Erreichen der nächsten
Station auf das Fahrzeuggerät FT übertragen. Wenn das
Fahrzeug die Station verlassen hat, wird der Ort des
vorausliegenden Gefahrenpunktes kontinuierlich auf das
Fahrzeuggerät FT übertragen. Damit kann das Fahrzeug
sicher und pünktlich bis zur nächsten Haltestelle ener-
gieoptimal geführt werden. Bei der Fahrt werden alle Ge-
10 schwindigkeitsbeschränkungen, die Streckenneigungen und
die Gefahrenpunkte berücksichtigt, und die Einflüsse al-
ler Störungen, z.B. Gegenwind, werden kompensiert. Jedes
Fahrzeug meldet dem Stationsrechner STR1, STR2 bzw. STR3
seine Abfahrzeit t_{Ab} , die über den jeweiligen Stations-
15 rechner zur Operationszentrale OZ gelangt. An der Stre-
ke wird der Ort des Fahrzeuges kontinuierlich gemessen
und ebenfalls zur Operationszentrale OZ übertragen. Mit
diesen Informationen wird die zeitliche Voraussrechnung
angestellt, um Konflikte bereits vor ihrem Eintreten zu
20 neutralisieren und Stauungen zu vermeiden. Die statio-
nären Komponenten des Systems können Daten über die vor-
handenen Verbindungen austauschen.

Zunächst soll die Optimierungsaufgabe formuliert werden:
25 Gesucht wird eine zulässige Steuerung \underline{u} (v, s, t) aus ei-
nem Steuerbereich derart, daß das Fahrzeug aus dem Quel-
len- zum Zielbahnhof so pünktlich überführt wird, daß
bei der Einhaltung der Steuergrößen-, Orts- und Geschwin-
digkeitsbeschränkungen die verbrauchte Energie ihren
30 kleinsten Wert annimmt. Der Steuerbereich liegt dabei in
den Grenzen, die durch die maximale spezifische Zugkraft
bzw. Bremskraft bestimmt werden. Der für die Geschwindig-
keit und den Ort zugelassene Bereich wird durch die weg-
abhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen und dadurch be-
35 stimmt, daß das Fahrzeug nicht zurück oder über das Ziel
hinausfahren darf.

Zur Lösung der gestellten Optimierungsaufgabe wird das "Optimierungsverfahren von Bellman" gewählt. Dieses Optimierungsverfahren wurde von Belman als "dynamische Programmierung" bezeichnet. Hierbei wird das gegebene Problem in eine Klasse ähnlicher Aufgaben eingebettet, die alle gemeinsam zur Lösung gelangen, wie es in Figur 3 der Darstellung nach angedeutet ist. Die Kanten eines Zustandsquaders ZQ entsprechen der längsten Fahrzeit t_f , der Streckenhöchstgeschwindigkeit VM und dem Haltestellenabstand HAD zwischen dem Quellen- und dem Zielbahnhof. Die Fahrzeit bei planmäßiger Abfahrt ist mit t_p und bei verspäteter Abfahrt mit t_v bezeichnet. Bereiche frühzeitiger bzw. verspäteter Abfahrzeitpunkte tragen das Bezugszeichen X bzw. Y. Die optimale Trajektorie, die vom Fahrzeug bei dem energieoptimalen Fahren beschrieben wird, liegt in diesem Zustandsquader ZQ. Die theoretisch unendlich vielen möglichen Zeit-, Orts- und Geschwindigkeitswerte werden diskretisiert, um ihre Anzahl endlich zu halten. Auf diese Art entsteht ein feinesmaschiges Gitterwerk im Zustandsquader ZQ. Die Berechnung aller Werte braucht sich dann nur noch auf die Gitterpunkte zu beschränken. Das Vorgehen besteht darin, alle möglichen Verbindungstrajektorien abzusuchen, die die verbrauchte Energie zu einem Minimum machen. Das Zeitintervall T entspricht der Abtastzeit bei der Meßwert- erfassung. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß der gesamte Bereich innerhalb des Zustandsquaders ZQ abgesucht wird, wodurch alle diffizilen mathematischen Untersuchungen über hinreichende Bedingungen, Eindeutigkeit und Existenz entfallen. Einschränkungen für die Geschwindigkeit und den Ort wirken sich nur positiv aus, in dem der abzusuchende Bereich und damit der Aufwand verkleinert wird.

Da die Lösung der hier gestellten Optimierungsaufgabe eine Variation des Abfahrzeitpunktes zuläßt, aber immer

eine pünktliche Ankunft anstrebt, wird bei der Anwendung von Belman's Methode die Strategie der Rückwärtsrekursion gewählt. Für jeden der Gitterpunkte (v, s) des Zustandsquaders ZQ auf der Stufe $k = N-1$ wird diejenige Trajektorie gesucht, die zum Zielbahnhof führt. Die Steuergröße und die verbrauchte Energie jeder Trajektorie werden berechnet und an dem entsprechenden Gitterpunkt abgespeichert. Man setzt $k = N-2$ ein und sucht für alle Gitterpunkte auf dieser Stufe die Steuergröße der energieoptimalen Trajektorie, die über die Stufe $k = N-1$ zum Zielbahnhof führt: Dabei wendet man das Optimierungsprinzip von Belman an. So rückwärts schreitend erreicht man schließlich die Stufe $k = 0$ und damit insbesondere auch den Quellenbahnhof. Die energieoptimale Steuergröße wird immer an dem entsprechenden Gitterpunkt abgespeichert.

Figur 4 veranschaulicht ein Beispiel des Zustandsquaders ZQ für einen Fahrzeugtyp und für einen bestimmten Streckenabschnitt. Vor der Ankunft des Fahrzeugs an der Haltestelle muß der Zustandsquader schon im Speicher des Stationsrechners vorhanden sein. Nach der Ankunft des Fahrzeuges an der Haltestelle wird der Zustandsquader ZQ auf das Fahrzeuggerät übertragen. Dieser Zustandsquader, der die energieoptimalen Steuergrößen beinhaltet, wird von der Fahrzeugsteuerung FG1 in Figur 1 weiter verarbeitet. Es ist eine Beispielsrechnung gezeigt mit vier Stufen, wobei der Haltestellenabstand 1000 m und die Fahrzeit 100 sec beträgt. Die energieoptimalen Steuergrößen werden rechts unterhalb der jeweiligen Gitterpunkte vermerkt. Während eines Zeitintervalls (Differenz zwischen zwei benachbarten Stufen) besteht die Steuergröße aus zwei diskreten Werten

$$u_1 \quad \text{für } 0 \leq t \leq T/2$$

und

$$u_2 \quad \text{für } T/2 \leq t < T$$

Wenn aufgrund der Orts-, Geschwindigkeits- und Steuergrößenbeschränkungen überhaupt keine Trajektorie existiert, auf der das Fahrzeug vom betrachteten Gitterpunkt nach dem Zielbahnhof fahren kann, wird sinngemäß
5 der Steuergröße der Wert ∞ zuerteilt, d.h., das Fahren über diesen Gitterpunkt ist verboten.

In der Dispositionszentrale DZ in Figur 2 ist ein zentraler Rechner ZR (Figur 1) vorhanden, der den Zustandsquader ZQ (Figur 1,3) mit den energieoptimalen Steuergrößen gemäß der beschriebenen Arbeitsweise erstellt.
10

Figur 5 veranschaulicht diese Einrichtung ZR mit dem Zustandsquader ZQ. Als Eingabedaten EG für den Rechner ZR dienen die Fahrzeugdaten, die längste Fahrzeit t_f , der Haltestellenabstand und die Streckendaten. Die Streckendaten bestehen aus zwei der vier zu berücksichtigenden Nebenbedingungen: Es sind die wegabhängigen Streckenneigungen (Gefälle, Steigung) und die wegabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen. Für jeden Fahrzeugtyp und für jeden Streckenabschnitt (Abstand zwischen zwei Haltestellen) wird ein derartiger Zustandsquader erstellt.
15
20

Figur 6 zeigt den Aufbau der Fahrzeugsteuerung FG1 (Figur 1). Die Einrichtung besteht aus dem Zustandsquader ZQ (energieoptimale Steuergrößen), einem energieoptimalen Regler EOR und einem mathematischen Fahrzeugmodell MFM. Sobald das Signal Fahrt FS1 entweder von der Zentrale oder einer Einrichtung an Bord des Fahrzeugs ausgelöst wird, wird dieser Zeitpunkt als Abfahrzeitpunkt bezeichnet und an die Stufenzahl k angepaßt, vgl. dazu Figur 4. Da das Fahrzeug am Quellenbahnhof steht, haben die Istgeschwindigkeit v_{ist} und der Istort s_{ist} den Wert Null. Aus diesen drei Daten (v, s, k) resultiert aus
25
30 dem Zustandsquader ZQ die energieoptimale Steuergröße \underline{u} . Entsprechend der entnommenen Steuergröße wird der
35

Fahrbefehl UST an den Schalter S1 (Figur 1) weitergeleitet. Gleichzeitig wird dieser Fahrbefehl in das mathematische Fahrzeugmodell MFM eingegeben. Das mathematische Fahrzeugmodell fährt auch parallel zum realen Fahrzeug und dient zur Interpolation der energieoptimalen Steuergröße, wenn das Fahrzeug durch die Einflüsse von Störungen die optimale Trajektorie verlassen hat oder die Istgeschwindigkeit und der Istort nicht mit einem Gitterpunkt im Zustandsquader ZQ zusammenfallen.

Im einen Fall wird die energieoptimale Steuergröße u aus dem Zustandsquader entnommen. Hat diese Steuergröße einen endlichen Wert, wird demgemäß der Fahrbefehl UST an den Eingang des Schalters S1 gegeben. Ist aber dieser Wert unendlich, dann hat während des letzten Zeitintervalls eine Störung auf das Fahrzeug eingewirkt, wodurch das Fahrzeug den verbotenen Zustand erreicht hat. Bei der Erstellung des Zustandsquaders ZQ wurde ja das Fahren über die Gitterpunkte mit dem Wert ∞ verboten. Der energieoptimale Regler EOR prüft nicht, ob dieses Fahrverbot durch die Orts- bzw. Geschwindigkeitsbeschränkungen verursacht wurde, sondern bestimmt näherungsweise eine energieoptimale Steuergröße. Zu diesem Zweck ist ein Regelalgorithmus entwickelt worden. Dieser Regelalgorithmus ist in EOR, Figur 6, realisiert und benötigt den Istort und die Istgeschwindigkeit des Fahrzeugmodells. Diese beiden Werte werden vom mathematischen Fahrzeugmodell MFM geliefert. Nach dieser Bestimmung wird dementsprechend der Fahrbefehl UST an den Schalter S1 geliefert.

Im anderen Fall ist angenommen, daß die Istgeschwindigkeit und der Istort des Fahrzeugs von den Koordinaten eines Gitterpunktes im Zustandsquader ZQ abweichen. Dann wird zur näherungsweisen Bestimmung der Steuergröße wieder eine Interpolation erforderlich. Der be-

-12- 16-

VPA 80 P 8 0 3 0 DE

nötigte Regelalgorithmus ist auch im Regler EOR realisiert worden, und das mathematische Fahrzeugmodell MFM wird auch einbezogen. Anschließend wird die Stellgröße an den Schalter S1 weitergegeben.

5

Mit dem Istort und der Istgeschwindigkeit des Fahrzeugmodells MFM wird aus dem Zustandsquader ZQ die energieoptimale Steuergröße u abgelesen und in das mathematische Fahrzeugmodell MFM eingesetzt. Dieses trifft immer einen Gitterpunkt, weil der Zustandsquader ZQ mit diesem Fahrzeugmodell MFM erstellt wurde und das Modell keine Störung während des Fahrens erfahren kann. Nach jedem Zeitintervall werden die obigen Schritte durchlaufen bis das Fahrzeug den Zielbahnhof erreicht hat.

15

Die Eigenschaft dieses Fahrzeuggerätes und der Einrichtung zur Erstellung des Zustandsquaders ZQ, daß die energieoptimalen Steuergrößen durch die Funktionen u (v,s,t) nach jeder Abtastzeit in Abhängigkeit vom gerade vorliegenden Fahrzeugzustand (Istgeschwindigkeit und Istort) bestimmt werden, ist regelungstechnisch günstig, da es die Möglichkeit bietet, auf das Fahrzeug einwirkende Störungen, z.B. Gegenwind, zu kompensieren. Hier gelten als Störungen alle Einflüsse, die das Fahrzeug bei dem energieoptimalen Fahren behindern, dadurch wird es schneller oder langsamer als es eigentlich fahren sollte. Unabhängig davon, ob das Fahrzeug durch Einflüsse von Störungen einen Gitterpunkt trifft oder nicht, wird immer eine energieoptimale Steuergröße aus dem Zustandsquader ZQ entnommen oder mit der Interpolation bestimmt. Das Fahrzeug folgt annähernd immer einer der energieoptimalen Trajektorien, die pünktlich zum Zielbahnhof führen.

Bei der Erstellung des Zustandsquaders ZQ wurde bei dem angewandten Optimierungsverfahren von Belman die Rück-

~~-15-~~ -17-

VPA 80 P 8 0 3 0 DE

- wärtsrekursion gewählt. Der Vorteil ist, daß neben der gesuchten energieoptimalen Trajektorie von einem vorgegebenen Quellenbahnhof nach dem Zielbahnhof die Rückwärtsrekursion zusätzlich energieoptimale Trajektorien
- 5 von anderen Punkten im zugelassenen Bereich zum Zielbahnhof liefert. Dies ist eine Folge der Einbettung der gestellten Optimierungsaufgabe in verschiedene Klassen ähnlicher Aufgaben. Falls diese Störungen das Fahrverhalten des Fahrzeugs in der Art beeinflussen, daß bei-
- 10 spielsweise die Istgeschwindigkeit gleich der Geschwindigkeitsbeschränkung ist, schaltet sich die Fahrzeugsicherung ein und übernimmt die weitere Regelung des Fahrzeuges.
- 15 Die Eigenschaft, daß die energieoptimalen Steuergrößen als Funktion des Istortes und der Istgeschwindigkeit ergeben haben, hat auch andere Vorteile, die man an Hand von Figur 4 sehen kann:
- 20 Die Zeitachse t ist die Menge aller Abfahrzeitpunkte aus dem Quellenbahnhof. Zur Erstellung des Zustandsquaders wählt man die längste Fahrzeit, und bei der Abfahrt vom Quellenbahnhof entnimmt man entsprechend dem Abfahrzeitpunkt auf der Zeitachse die zugehörige
- 25 Steuergröße und somit wird das Fahrzeug nach der erläuterten Strategie bis zum Zielbahnhof geführt. Bei dem Beispiel nach Figur 4 kann das Fahrzeug auf der Stufe $k = 0$ bzw. 1 noch energieoptimal bis zum Zielbahnhof fahren, aber nicht mehr auf der Stufe $k = 2$ bzw. 3.
- 30 Soll das Fahrzeug aus irgendeinem Grund erst auf der Stufe $k = 2$ bzw. 3 abfahren, so sendet der energieoptimale Regler das Signal FS2 (Figuren 1, 6) an die Fahrzeugsicherung FG2, die das Fahrzeug bis zum Zielbahnhof führt.

- 18 -
~~- 14 -~~

VPA 80 P 8 0 3 0 DE

Die Zeit- und Ortsachse bilden zusammen eine Ebene, die die Menge aller Gitterpunkte mit der Geschwindigkeit Null darstellt. Wenn ein Fahrzeug aus irgendeinem Grund auf dieser Ebene zum Stillstand gekommen ist, kann es
 5 noch energieoptimal bis zum Zielbahnhof geführt werden. Voraussetzung ist, daß eine endliche Steuergröße an den entsprechenden Haltepunkten im Zustandsquader ZQ vorge-
 merkt ist und das Fahrzeuggerät sowie die Antriebsorgane nicht fehlerhaft geworden sind. Gemäß Figur 4 ist auf
 10 sämtlichen Stufen mindestens eine energieoptimale Abfahrt von der Zeit-Ort-Ebene möglich.

Das Blockschaltbild gemäß Figur 7 veranschaulicht die Struktur der Einrichtung zur Fahrzeugsicherung FG2,
 15 Figur 1. Sie ist modular aufgebaut und gliedert sich in Umschaltstrategie UE, Abstandshaltung AG, Bremswegrechner BR, Schalter S2, Geschwindigkeitsregler VR und Grenzgeschwindigkeitsrechner VGR.

20 Grundsätzlich müssen im Bahnbetrieb folgende Sicherheitsanforderungen erfüllt werden:

a) Sicherheitsanforderung gegen Auffahren

$$s_H - s_{ist} \geq a$$

25

Istabstand \geq Bremswegabstand a,

dabei ist s_H der Hindernisort, also der Ort des festen oder beweglichen Gefahrenpunktes.

30

b) Sicherheitsanforderung gegen Überschreiten einer Streckenhöchstgeschwindigkeit

$$v_{ist} \leq v_G$$

35 Istgeschwindigkeit \leq Streckenhöchstgeschwindigkeit

Die Fahrzeugsicherung FG2 überwacht die Fahrzeugsteuerung FG1 nach jeder Abtastzeit in folgender Weise:

Der Grenzggeschwindigkeitsrechner VGR ermittelt zum Fahren nach dem Geschwindigkeitsprofil (v-Profil)(Figuren 1,7) aus diesem die Grenzggeschwindigkeit, die nicht überschritten werden darf. Die Umschaltstrategie UE vergleicht die Grenzggeschwindigkeit v_G mit der Istgeschwindigkeit v_{ist} , die von den Meßgliedern geliefert wird.

10 Solange $v_{ist} \leq v_G$ ist, gelangen die Fahrbefehle UST der Fahrzeugsteuerung FG1 zu den Stellgliedern. Ist aber die Bedingung nicht mehr erfüllt, werden die Fahrbefehle UST vom Schalter S1 in Figur 1 nicht mehr durchgelassen, d.h. das Signal FS3 betätigt S1, und die Fahrbefehle USI der

15 Fahrzeugsicherung FG2 gelangen dann zu den Stellgliedern. Der Geschwindigkeitsregler VR bildet aus v_{ist} und v_G die Fahrbefehle USI. Die Istgeschwindigkeit wird von dem Geschwindigkeitsregler VR in engen Toleranzgrenzen unabhängig von der Streckenneigung und dem Betrag des Fahrzeugs auf die ermittelte Grenzggeschwindigkeit geregelt.

20

Zur Abstandshaltung ermittelt der Bremswegrechner den Bremswegabstand a aus der Istgeschwindigkeit. Die Umschaltstrategie UE bildet den Istabstand ($s_H - s_{ist}$) zwischen einem vorausfahrenden Fahrzeug und dem folgenden Fahrzeug. Solange der Istabstand größer als der Bremswegabstand a ist, gelangen die Fahrbefehle UST der Fahrzeugsteuerung FG1 zu den Stellgliedern. Ist aber die Sicherheitsanforderung gegen Auffahren nicht mehr erfüllt,

25 werden die Fahrbefehle UST nicht mehr durchgelassen, und die Fahrbefehle (Sicherungsbehehle) USI der Fahrzeug-sicherung FG2 gelangen zu den Stellgliedern. Zu dem Zeitpunkt wird der Abstandsregler AG eingeschaltet. Dieser bildet aus dem Istabstand s_H und dem Bremswegabstand a einen Sollwert v_{SR} für den Geschwindigkeitsregler VR.

30

35

Beim Abstandsregler AG wird das Konzept der zweischlei-
figen Kaskadenregelung angewendet. Den inneren Regelkreis
bildet dabei die Geschwindigkeitsregelung und den äußeren
Regelkreis die Abstandsregelung. Der Sollwert für den Ge-
5 schwindigkeitsregler ist v_G bei dem Fahren nach dem Ge-
schwindigkeitsprofil und v_{SR} bei der Abstandshaltung.
Das Signal FS4 leitet bzw. sperrt jeweils einen von die-
sen Werten mit Hilfe des Schalters S2 für den Eingang des
Geschwindigkeitsreglers VR. Der Abstandsregler AG beein-
10 flußt das Fahrzeug in der Art, daß beim stehenden Hinder-
nis das Fahrzeug bis zum Erreichen des Hindernisses zum
Stillstand gebracht werden muß.

Die beiden sicherheitstechnischen Einrichtungen des
15 Fahrens nach dem Geschwindigkeitsprofil und der Abstands-
haltung überwachen sich gegenseitig. Angenommen das Fahr-
zeug fährt mit dem Abstandsregler AG überschreitet dann
die Istgeschwindigkeit die Grenzgeschwindigkeit, so
schaltet die Umschaltstrategie UE den Abstandsregler AG
20 über den Schalter S2 aus und der Geschwindigkeitsregler
VR erhält die Grenzgeschwindigkeit v_G als Sollwert, vor-
ausgesetzt, daß in diesem Augenblick der Sicherheitsab-
stand noch gewährleistet ist.

25 Umgekehrt, wenn nach dem Geschwindigkeitsprofil gefahren
wird, überwacht die Umschaltstrategie UE den Abstand zwi-
schen dem Fahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug.

Die Fahrzeugsicherung FG2 ist mit der Fahrzeugsteuerung
30 FG1 über das Signal FS2 (Figur 1, 7) gekoppelt. Die Fahr-
zeugsteuerung FG1 sendet das Signal FS2 an die Fahrzeug-
sicherung FG2 ab, wenn die Verspätung so groß ist, daß
kein energieoptimales Fahren möglich ist. Das Fahrzeug
wird dann mit dem Geschwindigkeitsregler VR geführt, der
35 als Sollwert die Grenzgeschwindigkeit v_G erhält.

-21-
Leerseite

80P8030DE

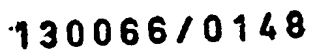


FIG 2

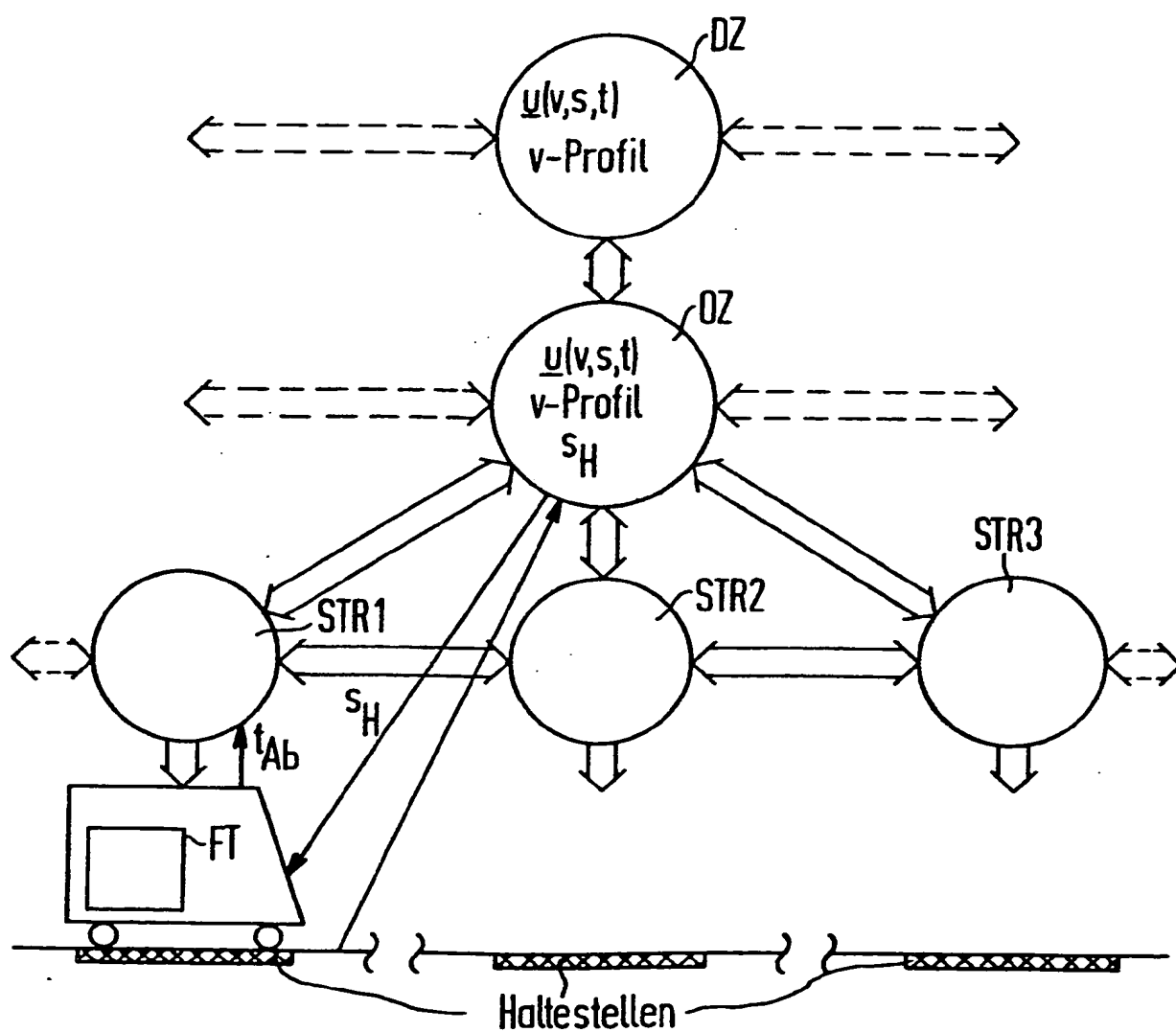
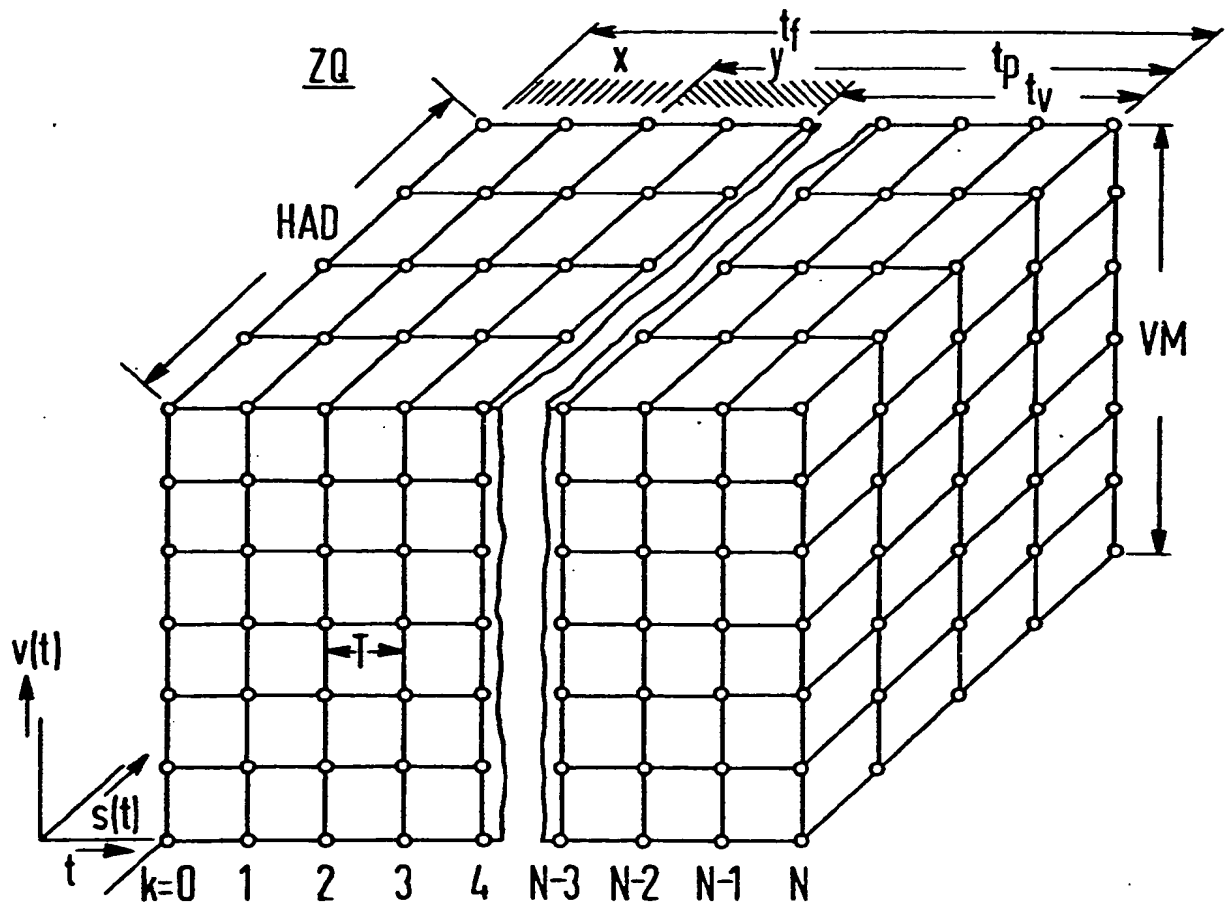


FIG 3



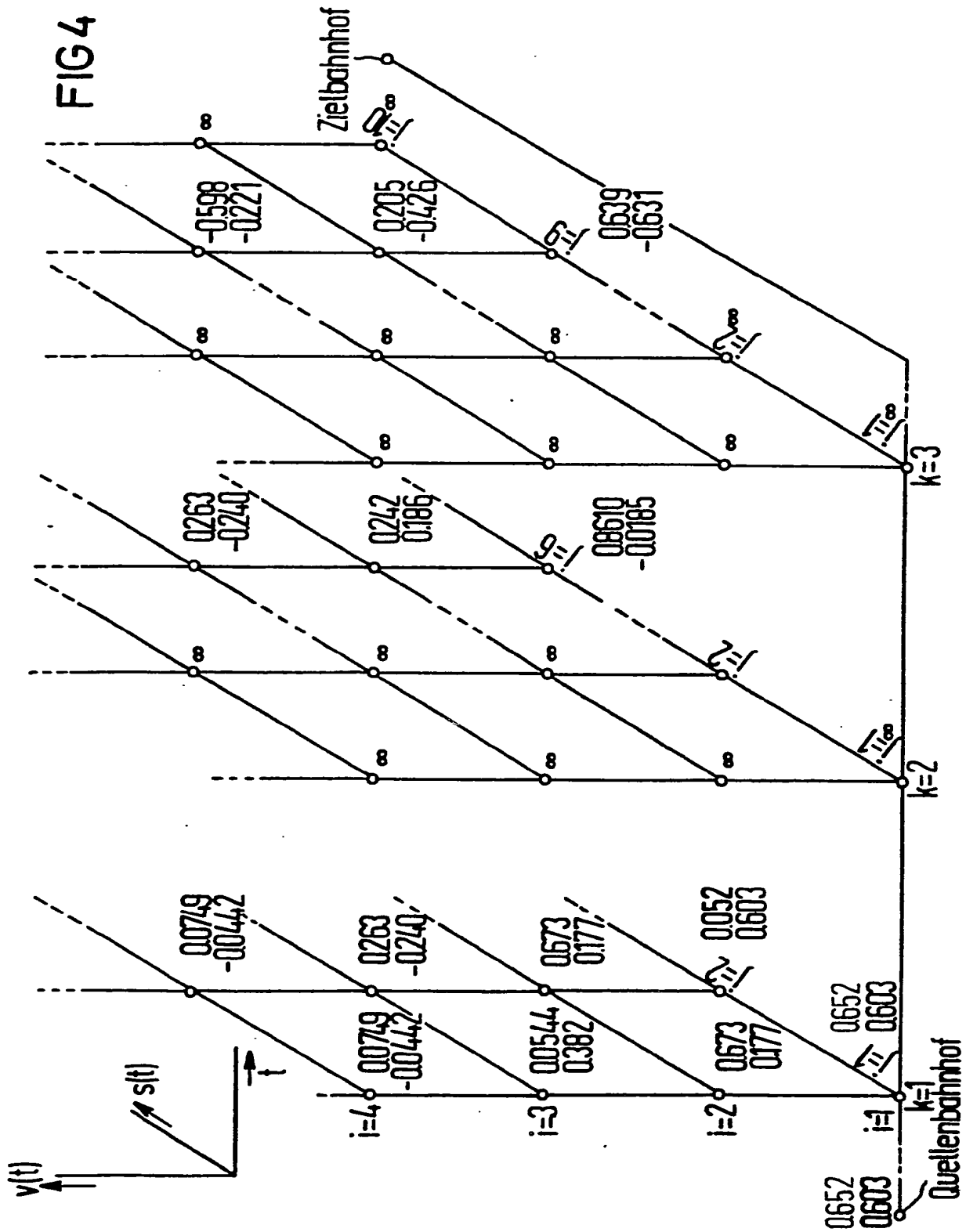


FIG 5

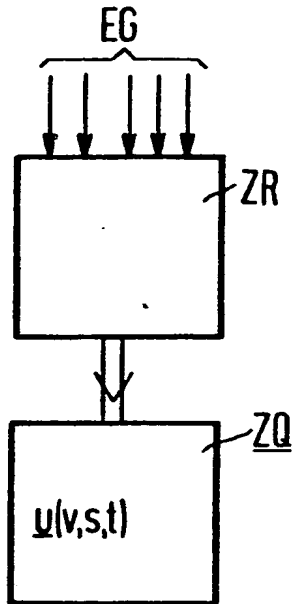
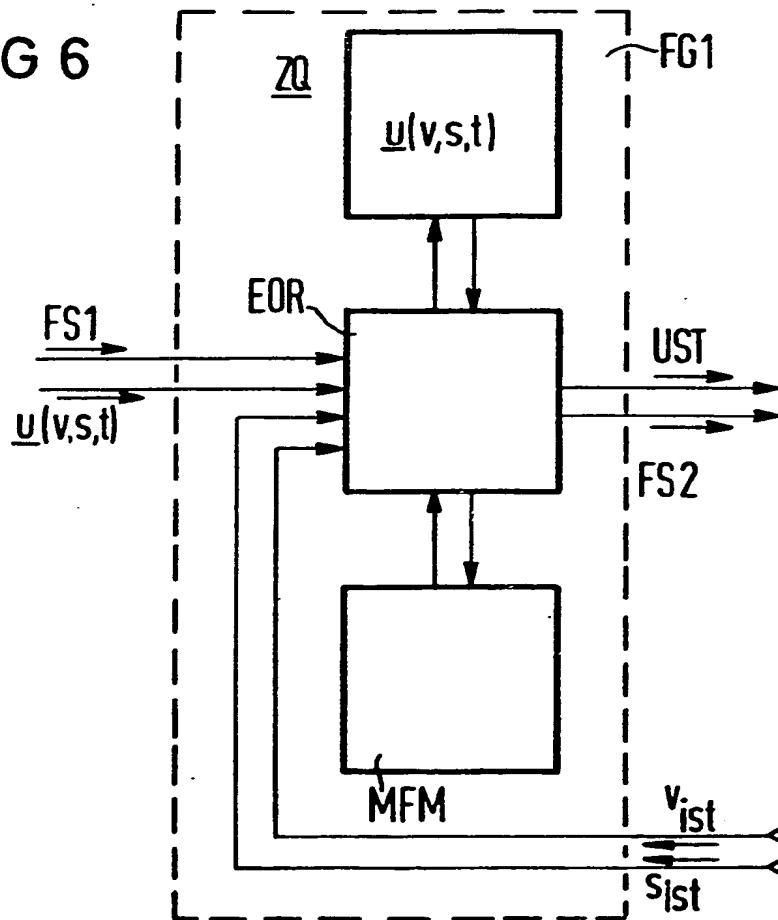


FIG 6



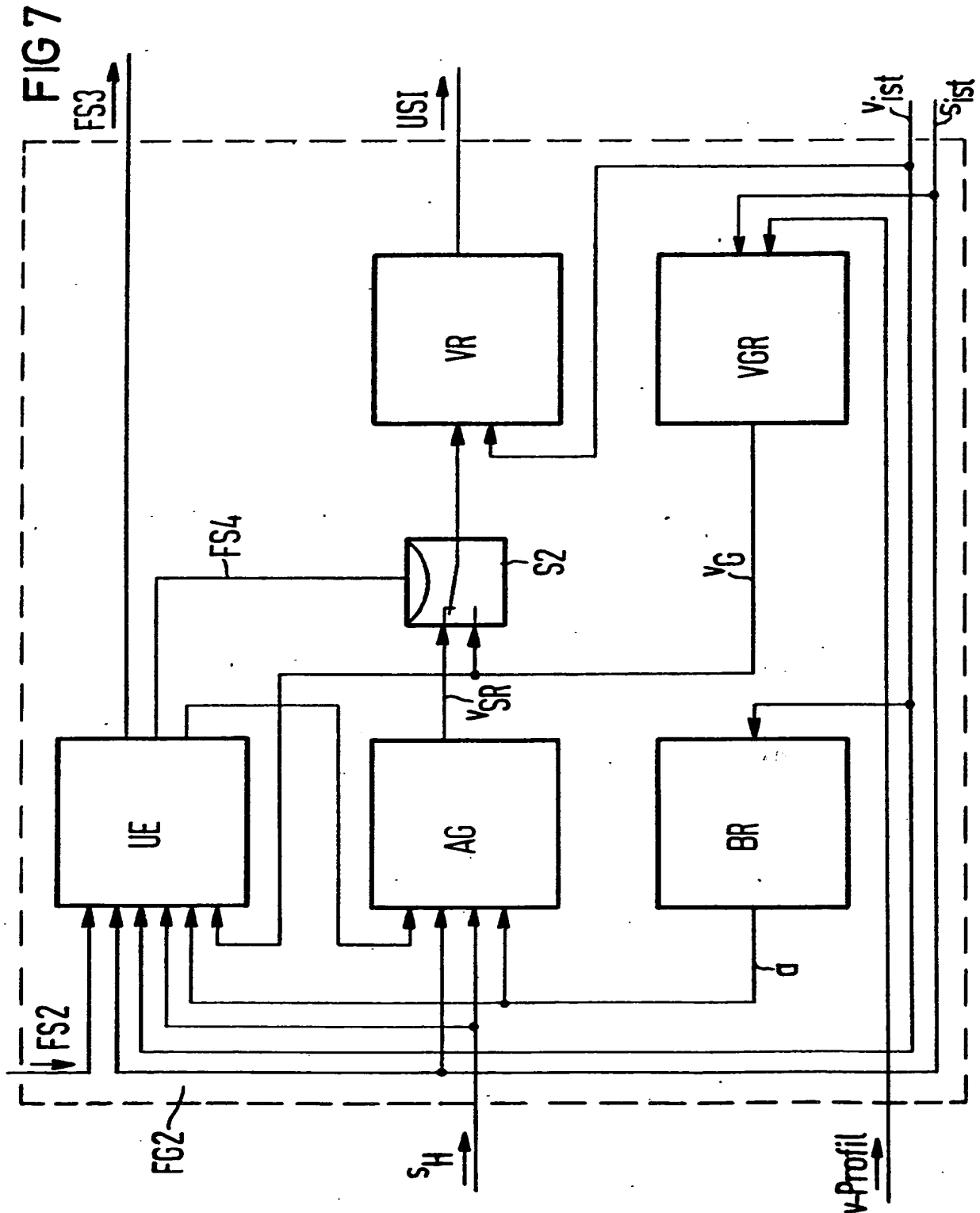


- 26 -

6/6

3026652

80P8030DE



130066/0148